

我国古建筑木构件及木质文物保护技术 发展历程与展望

徐佳鹤, 王超, 张斌

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 文化遗产保护是传承历史文化、增进民族团结、维护国家统一及社会稳定的重要基础。总结中国林业科学研究院木材工业研究所古建筑木构件及木质文物保护技术的发展历程, 概述我国现有技术及其应用实施进展, 并基于现状分析未来的发展趋势。

关键词: 木材工业研究所; 古建筑木构件; 木质文物; 木材保护技术

中图分类号: K876.6; S781; TS61 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2020) 06-0039-05

Review and Prospect Analysis of Conservation Techniques in Heritage Timber Structures in China

XU Jia-he, WANG Chao, ZHANG Bin

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The conservation of cultural heritage is an exceptional foundation for inheriting historical culture, enhancing national unity, ensuring national security, and enduring peace and stability. This paper reviews the history of conservation projects led by research teams from Chinese Research Institute of Wood Industry. The existing relevant technologies and their application of protecting timber structures of ancient architectural buildings are summarized. The review of current wood protection technologies and practices reveals the conceptual trend of the development in ancient timber structure conservation.

Key words: Chinese research institute of wood industry; ancient timber structure member; wood relics; wood protection technology

木材是天然有机材料, 在加工过程或使用期间, 都会受到气候变化、生物危害以及人为因素的影响, 导致木材性质发生不同程度的变化, 因此古建筑木构件及木质文物保护工作的主要原理与工艺和木材学有着密切的关系。中国林业科学研究院木材工业研究所(简称木材所)成立于1957年, 作为我国木

材科学与技术领域综合性国家级研究机构, 历经几代科学家的传承, 始终坚持利用先进的木材科学与技术, 为我国文化遗产保护工作提供技术支撑。笔者对国内主要从事木质文物保护研究的单位, 包括木材所、故宫博物院、中国文化遗产研究院、北京市古代建筑研究所、北京市文物建筑保护设计所等, 在古建筑木构件及木质文物保护方面的技术与成果进行了总结, 并对相关技术的发展趋势进行了分析, 以期为我国木结构古建筑及木质文物保护提供借鉴与思路。

收稿日期: 2019-09-25; 修改日期: 2020-10-16

作者简介: 徐佳鹤(1982—), 工程师。Email: ellipsis@qq.com

通讯作者: 王超, 男, 工程师。Email: wangc@criwi.org.cn

1 木材工业研究所古建筑木构件及木质文物保护技术发展历程

木材所首次参与古建筑木构件修护是在1968年,为筹备庆祝建国20周年,承担了天安门维修用木材的干燥、鉴定、防腐和物理力学试验任务。1972年,承担了“长沙马王堆一号汉墓棺槨木材的鉴定及随葬木器的研究”项目,针对汉墓棺槨木材的物理力学性质和木材耐腐性开展了研究,并对棺槨木材及随葬木器进行了树种鉴定,从此开启了木材所参与木质文物保护的历程。

经过五十余年的积累与拓展,木材所确立了古建筑勘查、建筑承载评估、木材识别、木材化学、木材保护、木材干燥、木材力学等多个与古建筑木结构及木质文物保护相关的科研方向,开展与古建筑木构件及木质文物保护相关的纵向课题20余项,获得国家及地方科研项目资助超过500万元,其中3项国家自然科学基金项目,取得了包括“建筑木构件防腐防虫技术手册”“西部木材腐朽标本和危害木材的昆虫标本”“无损检测仪器设备在古建筑木构件的安全评估的应用成果”“木构件年代的同位素检测技术”“遗址木构件防霉药剂筛选的研究”“古建筑木柱内部缺陷的快速检出及定量分析研究”、国家标准GB/T 33041—2016《中国陆地木材腐朽与白蚁危害等级区域划分》在内的多项技术成果,对保护我国历史文化遗产,确保重点文物保护工程质量做出了卓越贡献。

与此同时,木材所不断对科技成果进行实践验证并熟化,有关技术先后在50余项世界遗产或全国重点文物保护单位维护项目中应用,为我国五分之一的世界遗产保护提供了技术支撑,其中包括京津冀地区、青藏地区、大兴安岭地区、山西省等古建筑众多或出土文物密集地区,社会效益突出。

自1968年以来,木材所专家先后7次参与天安门城楼木构件维修与保护工作。进入21世纪以来,随着故宫博物院逐渐开启全面修缮保护工作,木材所专家团队已经参与或承担故宫古建筑木构件保护工作26项,涉及到故宫内部20余个宫殿或区域、150多个建筑单体的维修与保护工作。此外,木材所在古建筑木构件及木质文物保护领域的技术成果当中,有5项是依托北京市的文物保护单位开展的,

据统计共面向27家北京市古建筑文物保护单位开展了36项工作,其中包括天坛、香山、恭王府、国子监、雍和宫、智化寺、前门、圆明园、北海、北京大学、正阳门等多处重点文物保护单位。

1989年10月,举世闻名的布达拉宫规模最大的一次维修工程正式开工。由木材所木材学专家组成的布达拉宫防腐治虫小组,远赴西藏拉萨承担布达拉宫维修工程木构件防虫防腐项目。1989—2006年,木材所专家团队先后9次承担或参与了包括布达拉宫、罗布林卡、萨加寺西藏三大重点文物在内的西藏地区重点文物保护工程。

20世纪90年代开始,木材所先后参与了5项青海塔尔寺古建筑保护工程。2001年,木材所着力于西部地区典型环境下的木材腐朽规律研究,再次依托青海塔尔寺开展了古建筑木构件防腐阻燃表面处理技术的研究,并制订了国家标准GB/T 33041—2016。

除古建筑木构件修护以外,木材所同样重视对出土木质文物的保护工作,开展了木质文物水存保管过程腐朽及防治途径的研究,面向木质文物保护单位开展了多项重要工作,其中包括了著名的马王堆汉墓、北京老山汉墓、大葆山汉墓、广州西汉水闸、蓬莱古船、定陶汉墓以及“南海一号”沉船等。

2 古建筑木构件及木质文物保护技术

经过多年的研究与实践,古建筑木构件与木质文物保护技术已经逐渐形成一个成熟的体系。

2.1 现场勘查无损检测技术

古建筑木构件的保护与修缮工作需要前期做好现场勘查,该环节对后期的判断与评估极其重要。古建筑木构件的现场勘查要尽可能地避免对检测木构件的人为二次破坏,通过科学、可靠的检测技术为古建筑修缮提供数据支撑和评估依据^[1-2]。

早在2001年木材所就首次采用超声波方法对北京大钟寺博物馆木质钟架材质进行了勘查^[3],并先后研究了超声波检测^[4]、皮罗钉检测^[5]、阻抗仪检测^[6]、应力波断层扫描仪^[7]在古建筑木构件勘查检测中的应用。基于以上技术,北京古建研究所提出从古建筑木构件特点出发,结合仪器特点,分类检测古建筑木构件的无损评估体系^[8],此后北京林业大学采用应力波测试仪、阻抗仪检测和含水率测定仪3种仪

器对明十三陵裕陵木构件进行了无(微)损检测^[9]。近年来,木材所以古建筑木构件常用木材为研究对象,针对阻抗仪检测、应力波检测及雷达扫描等无损检测技术应用于古建筑木构件勘查开展了一系列研究^[10]。故宫博物院以古建筑木构件常用的杉木木材为研究对象,开展常见残损的阻抗仪检测试验研究^[11]。陕西省文物保护研究院采用自主研发的整套超声CT检测系统,实现建筑木构件裂缝及孔洞的检测^[12]。

古建筑木构件无损检测勘查技术逐渐向系统化、规律化的方向发展,进一步降低无损检测对木构件的损伤程度;针对不同情况、不同木构件,采用不同仪器或者尝试两种甚至多种仪器联合使用,提高初步识别与判断精度,提高勘查工作的效率和自动化程度,逐渐推动古建筑勘查实现定期勘查,并向实时监测发展。

2.2 木构件力学承载性能评估

利用勘查检测数据可以初步判断木构件内部的材质状态和可能存在的损坏,再通过科学合理的分析,可对木构件承载能力做出有效的预测和判断。木材所的专家利用木材力学科学与技术对木结构建筑进行了研究^[13-14],在木构件承载能力^[15-16]、木构件节点性能^[17]、木结构建筑横向振动评估^[18]等方面取得了一系列研究成果。故宫博物院采取理论分析与现场勘查相结合的方法,研究了故宫古建大木结构榫卯节点残损问题^[19],在木结构抗震性能^[20]、斗拱典型残损^[21]等方面取得了大量的研究成果。北京工业大学则在木结构古建筑安全性评估方面利用多种先进算法,有效地提升了木结构古建筑安全性等级评估的准确性^[22]。木材所通过对结构用木质材料强度标准值的确定^[23-24],构建了整套材料安全评估体系,相关理论成果被GB 50005—2017《木结构设计标准》采纳,成果应用于北京冬奥会木结构、北京天安门城楼、北大红楼、装配式重组竹建筑等20多项委托项目。

古建筑的定期勘查和实时监测,可以有效地实现对古建筑承载性能的监测和预判。近年来,通过对大量老旧建筑用木结构材进行长期载荷能力试验与数据分析,已逐渐形成科学的理论与方法,实现对古建筑木构件承载性能的预测。

2.3 木材树种识别技术

木材树种鉴定和化学成分分析,是古建筑木构件和木质文物保护过程中极其重要的环节。木材所木材解剖学科可以追溯到1928年,经过近百年的学科发展,从简单的肉眼或放大镜宏观识别到光学显微镜下的微观识别,如今的木材识别技术不但能识别木材树种,还可以分析木材的年代^[25-26]。近年来,木材所在木材识别方面取得了很多技术上的突破,包括可以识别到种的DNA技术^[27]、化学指纹木材识别技术、计算机视觉木材识别技术和近红外光谱识别技术等。目前,故宫博物院以及一些国外研究机构的文物保护学者已率先将近红外光谱结合化学计量学新型分析技术用于书画、丝织品、玉器等文物的检测与分析工作中^[28],这项技术同样也在木材识别中展现了广阔的应用前景。木材所建有全国标本存量最大的木材标本馆、DNA标记信息数据库和NIR光谱数据库,制定了多项标准^[29],并应用于珍稀濒危树种保护、古木与化石木鉴定和古建筑木构件及木质文物材料鉴定等方面^[30-31]。

由于传统木材识别技术存在一定的局限性。近年来,在DNA标记、稳定同位素和近红外光谱技术等方面探索得到的一系列木材识别新技术,拓宽了木材的识别范围,提高了识别精度,但在木质文物的产地和年代判断方面仍有技术难点有待突破。

2.4 木材保护处理技术

做好古建筑的新旧木构件的干燥、阻燃、防腐和防虫处理,是保护古建筑行之有效的方法与必要的措施,合理的木材保护技术更是古建筑维护和木质文物保护的重要保证。木材所在木材保护领域有着深厚的研究基础,在木材物理干燥、木结构用材防腐防虫、户外/野外用材防腐、湿地用材防腐、阻燃木质材料制备技术等方面取得了多项成果^[32]。经过室内、野外埋地耐久性与抗流失性试验研发的木材防腐防虫技术,绿色环保且适于古建筑木构件与木质文物,已经在多项国家重点文物保护维修工程中应用^[33-35]。木材所专家针对我国不同地区的古建筑虫害问题进行了深入的研究,并不断将有关研究成果应用于古建筑木构件保护中^[36-37]。

预防性保护始终是文物保护的重点,针对古建筑木构件和木质文物的预防性保护更是重中之重。

木材防腐和防虫技术已经成功应用于古建筑木构件防腐和防虫保护中,但是木材阻燃技术作为古建筑木构件预防性保护的关键内容,还仅限于在现代木结构建筑中的应用,未来的研究过程中需要大量的试验和实践来突破有关技术难点。

2.5 木构件及木质文物修复与加固技术

在古建筑木构件及木质文物修复与加固技术方面,仍有很多技术难点有待突破。故宫博物院结合古建筑榫卯节点力学性能在古建筑木构件的加固技术方面取得了一系列研究成果^[38]。北京工业大学以保留榫卯节点半刚性特点为出发点,对古建筑木构件榫卯节点加固技术开展了研究^[39]。然而,在木质文物修复与加固技术方面,如何根据地上文物、地下考古遗址中木质文物的不同情况,研究出相应的就地保护与加固处理技术,以更好的保留文物原本的材质和样貌,一直是木材所近年来重点开展的研究内容之一。随着纳米技术的发展,木材所针对出水木质文物的加固封护进行了研究^[40-41],通过纳米改性木质纤维素对木质材料进行修复与加固技术研究^[42-43],尝试利用纳米级木竹质纤维素对有更高精度要求的木竹质材料进行修复与加固,希望找到更适用于木竹质文物修复与加固的技术方法。

3 结语

着眼于我国古建筑木构件及木质文物保护技术的可持续发展,结合国际学科发展趋势以及国家社会经济发展的重大需求,针对国内与国外先进水平的差距,未来几年木材所古建筑木构件及木质文物保护研究工作应坚持“尊重木材本质”的原则,继续在无损检测、结构承载性能、木材识别技术、木材保护技术、木质修复与加固技术五大方面加强研究,并逐渐尝试将木材阻燃和木质修复技术应用于古建筑木构件及木质文物保护当中。

现代古建筑木构件及木质文物保护研究亟需与现有先进技术,乃至国际先进技术接轨。勘查方法不再只限于现有的检测手段,而是广泛应用各种先进的无损检测技术和3D成像技术;识别方法不再仅仅实现树种鉴定,而是广泛开展年代分析和发源地分析等;研究内容也不仅限于建筑研究过程,而是与化学过程、生物过程和地质气候过程紧密联系在

一起。预计未来3~5年,古建筑木构件及木质文物保护技术将更加重视学科交叉和综合集成,重视保护性研究项目和研究性保护工程相结合^[44]。通过文化遗产保护工作使国家民族的优秀文化更好地传承和发展,鉴知过去以启迪未来。

参考文献:

- [1] 陈勇平,王天龙,李华,等.宁波保国寺大殿瓜棱柱内部构造初探[J].林业科学,2011,47(4):135-140.
CHEN Y P, WANG T L, LI H, et al. Preliminary study on the melon-shaped column structure in the grand hall of Ningbo Baoguo temple[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(4): 135-140.
- [2] 陈勇平,黎冬青,李华,等.古建筑木构件现场分类及其无损检测技术[J].木材工业,2011,25(6):41-43.
CHEN Y P, LI D Q, LI H, et al. Selecting nondestructive methods for testing wood components in historical buildings[J]. China Wood Industry, 2011, 25(6): 41-43.
- [3] 李华,刘秀英.大钟寺博物馆钟架的超声波无损检测[J].木材工业,2003,17(2):33-36.
LI H, LIU X Y. Ultrasonic non-destructive evaluation of the wood frame for the Great Bell[J]. China Wood Industry, 2003, 17(2): 33-36.
- [4] 张训亚,姜笑梅,殷亚方.不同方向落叶松木材声速-超声参数特征及其与密度关系研究[J].木材加工机械,2017,28(4):24-28.
ZHANG X Y, JIANG X M, YIN Y F. Study on acousto-ultrasonic parameters of larch wood in different directions and its density relationship[J]. Wood Processing Machinery, 2017, 28(4): 24-28.
- [5] 黄荣凤,伍艳梅,李华,等.古建筑旧木材腐朽状况皮罗钉检测结果的定量分析[J].林业科学,2010,46(10):114-118.
HUANG R F, WU Y M, LI H, et al. Quantitative analysis of decaying detected by pilodyn in wood of ancient architecture[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(10): 114-118.
- [6] 李华,陈勇平,黎冬青,等.古建筑木构件阻力仪检测中影响阻力值的因素探讨[J].木材加工机械,2011(2):19-21,26.
LI H, CHEN Y P, LI D Q, et al. Influencing factors on the results of resistograph of wood components in historical building[J]. Wood Processing Machinery, 2011, (2): 19-21, 26.
- [7] 陈勇平,李华,黎冬青,等.古建筑木材中应力波传播速度的影响因素[J].木材工业,2012,26(2):37-40.
CHEN Y P, LI H, LI D Q, et al. Effects on stress wave speed inside wood members in historical buildings[J]. China Wood Industry, 2012, 26(2): 37-40.
- [8] 张涛,黎冬青,韩扬,等.无(微)损检测技术在木结构古建筑中的应用及发展[J].林业机械与木工设备,2011,39(8):10-12,16.
ZHANG T, LI D Q, HAN Y, et al. Application and development of nondestructive inspection technique in ancient wood buildings[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2011, 39(8): 10-12, 16.
- [9] 廖春晖,张厚江,王喜平,等.明十三陵裕陵修缮工程中的木构件无损检测[J].北京林业大学学报,2014,36(1):132-137.
LI CH H, ZHANG H J, WANG X P, et al. Nondestructive assessment of wood structural members at Yu Tomb of the Ming Dynasty[J]. Beijing Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(1): 132-137.
- [10] 陈勇平,高甜,李德山,等.马尾松木材内部空洞的雷达检测与定量评估[J].林业科学,2017,53(10):139-145.
CHEN Y P, GAO T, LI D S, et al. Detection and quantitative evaluation of internal cavity of *Pinus massoniana* wood by radar testing

- technology[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, 53(10): 139-145.
- [11] 李德山, 陈勇平. 木结构古建筑中杉木木材常见残损的阻力识别和判定研究[J]. *古建园林技术*, 2017 (2): 76-80.
- LI D S, CHEN Y P. Identification and determination of resistance to damage of Chinese fir wood in ancient wooden structures[J]. *Traditional Chinese Architecture and Gardens*, 2017 (2): 76-80.
- [12] 马宏林, 相建凯, 张刚, 等. 超声 CT 方法检测古建筑木构件缺陷研究[J]. *文物保护与考古科学*, 2018, 30(6): 74-81.
- MA H L, XIANG J K, ZHANG G, et al. The use of ultrasonic CT to detect defects in timber structures of historic buildings[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2018, 30(6): 74-81.
- [13] 周海宾, 费本华, 任海青. 世界木结构房屋研究的最新进展[J]. *木材工业*, 2006, 20(4): 1-3, 40.
- ZHOU H B, FEI B H, REN H Q. Evolutions of research on wood frame housing around the world[J]. *China Wood Industry*, 2006, 20(4): 1-3, 40.
- [14] 周海宾, 吕建雄, 徐伟涛. 我国结构用木材标准体系构建[J]. *木材工业*, 2012, 26(3): 44-47.
- ZHOU H B, LYU J X, XU W T. Establishing a standard system for structural wood products in China[J]. *China Wood Industry*, 2012, 26(3): 44-47.
- [15] ZHONG Y, JIANG Z H, REN H Q. Reliability analysis of compression strength of dimension lumber of northeast China larch[J]. *Construction & Building Materials*, 2015, 84:12-18.
- [16] ZHONG Y, REN H Q. Reliability analysis for the bending strength of larch 2×4 lumber [J]. *Bioresources*, 2014, 9(4): 6914-6923.
- [17] 张俊珍, 钟永, 赵荣军. 木结构螺栓连接的力学性能研究进展[J]. *木材工业*, 2012, 26(4): 39-42, 52.
- ZHANG J ZH, ZHONG Y, ZHAO R J. Reviews of mechanical properties for timber bolted joints[J]. *China Wood Industry*, 2012, 26(4): 39-42, 52.
- [18] 周海宾, 江泽慧, 费本华, 等. 木结构房屋中木楼板的振动及其适用性设计[J]. *木材工业*, 2008, 44(6): 143-147.
- ZHOU H B, JIANG Z H, FEI B H, et al. Evolution of design criteria to prevent vibration in wood frame floor [J]. *China Wood Industry*, 2008, 44(6): 143-147.
- [19] 周乾, 杨娜. 故宫古建筑榫卯节点典型残损问题分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2017, 15(5): 12-19, 38.
- ZHOU Q, YANG N. Typical structural health problems of tenon-mortise joints of ancient buildings in the Forbidden City[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2017, 15(5): 12-19, 38.
- [20] 周乾, 杨娜, 闫维明. 太和殿基座对上部结构抗震性能影响分析[J]. *地震工程学报*, 2017, 39(6): 981-995.
- ZHOU Q, YANG N, YAN W M. Influence of the Taihe Palace foundation bed on the seismic performance of its superstructure[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2017, 39(6): 981-995.
- [21] 周乾, 杨娜, 闫维明. 故宫古建筑斗拱典型残损问题分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2017, 43(1): 22-27.
- ZHOU Q, YANG N, YAN W M. Typical structural problems of bracket sets in the Forbidden City [J]. *Sichuan Building Science*, 2017, 43(1): 22-27.
- [22] 郭小东, 付体彪, 徐帅. 基于灰色白化权函数聚类法的木结构古建筑安全性评估[J]. *北京工业大学学报*, 2017, 43(5): 780-785.
- GUO X D, FU T B, XU SH. Safety assessment of timber ancient buildings based on grey clustering analytical method [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017, 43(5): 780-785.
- [23] 钟永, 武国芳, 任海青, 等. 基于正态随机样本确定结构用木质材料强度标准值的方法[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(11): 129-138.
- ZHONG Y, WU G F, REN H Q, et al. Determination method of characteristic strength for structural wood materials based on normal distribution and random sampling [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(11): 129-138.
- [24] ZHONG Y, WU G F, REN H Q, et al. A determination method of compressive design value of dimensional lumber [J]. *Journal of Wood Science*, 2018, 64(5): 526-537.
- [25] 黄荣凤, 鲍甫成, 李华, 等. 老山汉墓出土木材的年轮年代学研究[J]. *林业科学*, 2004, 40(5): 168-173.
- HUANG R F, BAO F CH, LI H, et al. Dendrochronolog research on excavated woods of Laoshan Han Tomb[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(5): 168-173.
- [26] DONG M Y, LU Y, JIANG X M, et al. AMS 14C dating and wood identification in ancient timber structures in Shanxi Province, China. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2017, 13: 361-371.
- [27] 殷亚方, 焦立超, 陆杨. DNA 条形码: 木材鉴别的新利器[J]. *科学*, 2018, 70(6): 29-31.
- [28] 谷岸. 近红外光谱结合化学计量学无损检测新技术在文物保护中的应用与展望[J]. *中国文物科学研究*, 2019: 72-76. Doi: 10.3969/j.issn.1674-9677.2019.01.012.
- [29] 姜笑梅, 殷亚方, 刘波. 木材树种识别技术现状、发展与展望[J]. *木材工业*, 2010, 24(4): 36-39.
- JIANG X M, YIN Y F, LIU B. Current status, development and prospect of wood identification technology[J]. *China Wood Industry*, 2010, 24(4): 36-39.
- [30] 殷亚方, 罗彬, 张之平. 晋东南古建筑木结构用材树种鉴定研究[J]. *文物世界*, 2010 (4): 33-36.
- [31] DONG M, ZHOU H, JIANG X M, et al. Wood used in ancient timber architecture in Shanxi Province, China[J]. *IAWA Journal*, 2017, 38(2): 182-200.
- [32] 马星霞, 蒋明亮, 覃道春. 木材腐朽菌的分子鉴定技术原理及研究进展[J]. *中国科技成果*, 2009 (1): 11-15.
- [33] 王平, 姜笑梅, 秦特夫, 等. 木材防腐技术在山海关镇东楼木结构中的应用[J]. *木材工业*, 2000, 14(4): 33-35.
- WANG P, JIANG X M, QIN T F, et al. Application of wood-preserving technology on wood-structure building in Shanhaiguan Town[J]. *China Wood Industry*, 2000, 14(4): 33-35.
- [34] 王平, 马星霞, 吕慧梅, 等. 西藏三大重点文物木结构防腐防虫技术(一)[J]. *木材工业*, 2011, 25(6): 44-47.
- WANG P, MA X X, LYU H M, et al. Preservation of wood structure in major ancient buildings in Tibet (Part I) [J]. *China Wood Industry*, 2011, 25(6): 44-47.
- [35] 王平, 马星霞, 吕慧梅, 等. 西藏三大重点文物木结构防腐防虫技术(二)[J]. *木材工业*, 2012, 26(1): 51-54.
- WANG P, MA X X, LYU H M, et al. Preservation of wood structure in major ancient buildings in Tibet (Part II) [J]. *China Wood Industry*, 2012, 26(1): 51-54.
- [36] 马星霞, 王洁瑛, 蒋明亮, 等. 中国陆地木材生物危害等级的区域划分[J]. *林业科学*, 2011, 47(12): 129-135.
- MA X X, WANG J Y, JIANG M L, et al. Biological hazard classifications and hazard map development for terrestrial applications of wood in China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(12): 129-135.
- [37] 马星霞, 蒋明亮, 王洁瑛. 气候变暖对中国木材腐朽及白蚁危害区域边界的影响[J]. *林业科学*, 2015, 51(11): 83-90.
- MA X X, JIANG M L, WANG J Y. The climate change effects on boundaries of wood decay and termite hazard zones in China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(11): 83-90.

(下转第 47 页)

表4 浸渍纸层压木质地板和多层实木复合地板承载量

Tab.4 Bearing capacity of laminate flooring and multi-layer engineered wood flooring

地板种类	温度/ ℃	湿度/ %	D/ m ²	温度/ ℃	湿度/ %	D/ m ²	温度/ ℃	湿度/ %	D/ m ²
浸渍纸层压 木质地板		35	107		35	92		35	78
	30	50	94	35	50	81	40	50	68
		65	81		65	71		65	61
多层实木 复合地板		35	120		35	103		35	86
	30	50	101	35	50	92	40	50	75
		65	93		65	80		65	67

表4结果表明随着温度、相对湿度的升高,地板承载量呈下降趋势,即随着甲醛释放量的增加,地板承载量减小。在低温低湿的情况下(30℃、35%),浸渍纸层压木质地板和多层实木复合地板的最大承载量分别为107和120 m²,在10 m²的室内空间内能铺装这么大面积的地板,远超地面面积,表明单纯从使用木地板的角度考虑是安全的。但本文仅计算了地板甲醛释放的承载量情况,在室内空间里还有很多装饰装修材料也会释放甲醛,如涂料、窗帘、纺织品、地毯,以及衣柜、橱柜等其他家具产品,所有材料甲醛释放表面积加起来可能远不止100多 m²,量的累加极有可能是导致室内环境污染浓度超标的原因。

两种地采暖用木质地板甲醛释放量检测结果只适用于本批次产品,并不能说明产品种类对甲醛释放量的影响,不同产品结构、生产工艺都会影响地板甲醛释放量,进而计算得到的承载量亦不同。

(上接第43页)

- [38] 周乾. 故宫太和殿某正身顺梁榫卯节点加固分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(1): 92-98.
ZHOU Q. Strengthening analysis of tenon-mortise joint of a face beam in Taihe Palace in the Forbidden City [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(1): 92-98.
- [39] 郇君虹, 马东辉, 郭小东, 等. 扁钢加固半榫、透榫及燕尾榫抗震性能试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(8): 763-771.
HUAN J H, MA D H, GUO X D, et al. Experimental study of aseismic behaviors of flexural tenon joint, through Tenon joint and dovetail joint reinforced with flat steel devices[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 45(8): 763-771.
- [40] GAO L, ZHAN X, LU Y, et al. pH-dependent structure and wettability of TiO₂-based wood surface[J]. Materials Letters, 2015, 142: 217-220.
- [41] GAO L, LU Y, CAO J, et al. Reversible photocontrol of wood-surface wettability between superhydrophilicity and superhydrophobicity based on a TiO₂ film[J]. Journal of Wood Chemistry and Technology, 2015,

3 结论

1) 以浸渍纸层压木质地板、多层实木复合地板为例, 推导了地采暖用木质地板的承载量计算方法及过程。计算地板的承载量, 必须要在与使用环境一致的条件检测地板的甲醛释放量, 或者已明晰甲醛释放量在不同温、湿度下的换算关系。

2) 室内空间地板的承载率对其甲醛释放率影响不显著, 进而对最终计算得到的地板承载量影响不显著, 所以在检测地板甲醛释放量时, 承载率可根据不同标准的要求设置。

3) 由于室内空间还有涂料、纺织品等其他材料释放污染物, 考虑基于甲醛释放的承载量时, 不能单一考虑某一种材料, 而是综合考虑室内所有释放甲醛的材料, 才能保证室内环境污染浓度符合 GB 50325—2020 的要求。建议尽快制定装饰装修材料承载量相关标准, 为消费者合理使用材料、保证室内家居安全提供依据。

参考文献:

- [1] GB 18580—2017, 室内装饰装修材料人造板及其制品中甲醛释放限量[S].
- [2] GB 50325—2020, 民用建筑工程室内环境污染控制规范[S].
- [3] GB/T 33043—2016, 人造板甲醛释放量测定大气候箱法[S].
- [4] 赵秀, 王宏棣. 地采暖用木质地板甲醛释放量检测方法的对比[J]. 木材工业, 2020, 34(2): 14-18.
ZHAO X, WANG H D. Comparison of testing methods for formaldehyde emissions from laminated wood flooring used in ground heating system[J]. China Wood Industry, 2020, 34(2): 14-18.
- [5] GB/T 17657—2013, 人造板及饰面人造板理化性能试验方法[S].

(本文编校 向 琴)

- 35: 365-373.
- [42] GAO L, LU Y, ZHAN X, et al. A robust, anti-acid, and high-temperature-humidity-resistant superhydrophobic surface of wood based on a modified TiO₂ film by fluoroalkyl silane[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 262: 33-39.
- [43] YIN J, YUAN T, LU Y, et al. Effect of compression combined with steam treatment on the porosity, chemical composition and cellulose crystalline structure of wood cell walls[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 155: 163-172.
- [44] 赵鹏, 林佳. 从天坛到养心殿: 研究性保护工程的轮回[J]. 建筑学报, 2018(10): 18-24.
ZHAO P, LIN J. From the altar of Heaven to Hall of Mental Cultivation (Yangxin Palace): The cycle of research-oriented preservation projects[J]. Architectural Journal, 2018 (10): 18-24.

(本文编校 向 琴)